

閉鎖性内湾の貧酸素水塊の形成機構に関する研究

山根伸之*・寺口貴康**・中辻啓二***

1. 緒 言

東京湾で観測される青潮は夏季に海底部で形成される貧酸素水塊の湧昇現象が原因であることは周知のことである。大阪湾での浅海定線調査に基づいて、城 (1986) は底層の酸素飽和度は表・底層間の水温差と相関が高いことを指摘した。水温躍層により上下混合が抑制される。その結果、下層で溶存酸素が消費され、貧酸素化が強まるとしている。しかし、下層の貧酸素化が、成層の安定度を示す鉛直密度差よりも水温差との関連が高いのは不合理な結論である。中村ら (1988) は、これらのデータに基づいて湾奥部の貧酸素化の消長は簡易な鉛直一次元の熱収支および酸素収支モデルで再現が可能と報告している。一方、ADCP を用いた伊勢湾の観測 (杉山ら, 1996) は、海底の流れは予想以上に速く、エスチュアリー鉛直循環による下層水の上層への湧昇が活発であることを示した。溶存酸素は密度躍層を通して上層から鉛直下方に供給されると仮定した城や中村らの論点に対峙するものである。そこで、本研究では三次元流動・水質モデルを用いた数値実験を行い、大阪湾湾奥における貧酸素水塊の形成機構の解明を行う。

2. 大阪湾の密度構造と貧酸素水塊の実態

大阪湾の底層、とくに湾奥部の底層では夏季を中心に溶存酸素消費量が増大する。図-1 は、大阪府水産試験場 (1973-1992) によって実施された大阪湾底層の酸素飽和度の 20 年平均値の水平分布を示す。2 月の底層の酸素飽和度はほぼ湾全域で 90% 以上である。一方、8 月には湾奥部において 30% 以下となる水域が広がっており、底生生物の生息が危ぶまれる。底層の貧酸素化の要因として、底泥の酸素消費量や底層水温のほか、上層からの酸素供給を遮断する水域の成層強度が挙げられる。城 (1986) は浅海定線調査における湾奥 12 地点平均の底層酸素飽和度と表・底層間の水温差、密度差の比較を図-2 のように示した。その結果、底層の酸素飽和度は、表・底層間

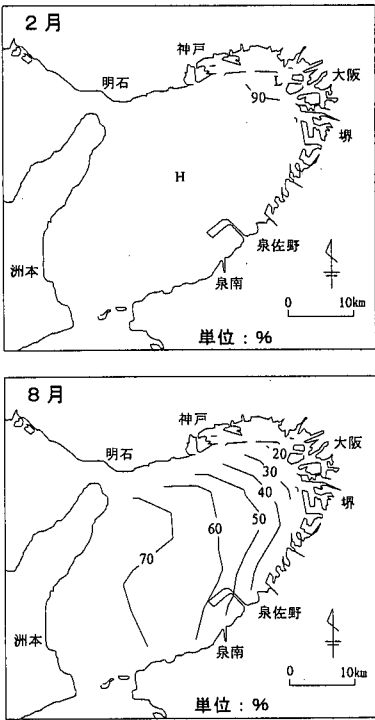


図-1 10 年平均の底層の溶存酸素飽和度の分布

の水温差と相関が高く、密度差との相関は低いと報告している。この理由として、出水時には表層の塩分が低下して表・底層間の密度差が増大するが、出水による上下混合で底層の貧酸素化が弱められること、また、渇水年には表層においても高塩分になり、密度差が小さくなるが、水温躍層により上下混合が抑制され、貧酸素化が強まるためとしている。さらに、水温差は鉛直混合の遮断経過時間を表現していると考えられ、このため表・底層の水温差が底層の貧酸素化を説明する目的にかなった有効な指標であるとしている。以上の考えの根拠には、「底層水への酸素供給は主として海面からの鉛直混合に依存している」という理解がある。中村ら (1988) は、湾奥部の貧酸素化の消長は簡易な鉛直一次元の熱収支および酸素収支モデルで再現できると述べている。一方、浅海定線調査で得られたデータをもとに、山根ら (1996) は観測

* 正会員 工博 (株)建設技術研究所大阪支社
** (株)JR 西日本
*** 正会員 工博 大阪大学大学院 教授

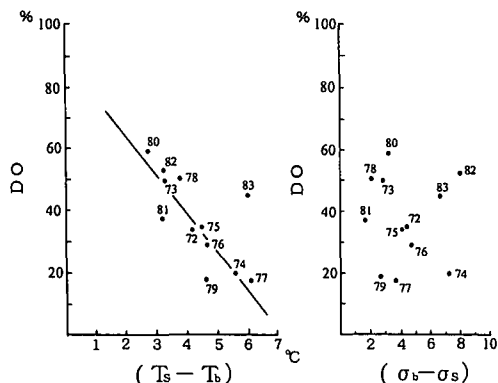


図-2 底層溶存酸素飽和度と表・底層水温差、密度差の関係(城, 1996)

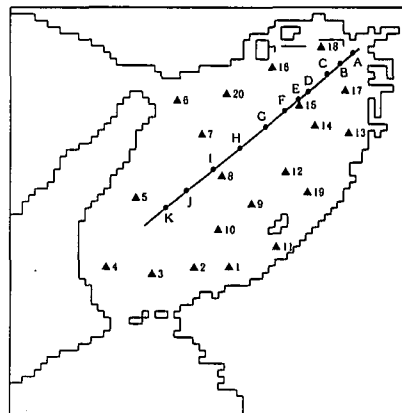


図-3 大阪湾の計算対象領域(▲：浅海定線地点, ●：酸索収支算定地点)

地点別の20年平均の底層酸素飽和度と表・底層密度差との関連性を調べた結果、両者に密接な関連があることを示した。さらに、山根ら(1998a)は大阪湾湾奥部の成層海域ではエスチュアリー循環に伴って生じる湾奥向きの流れが無視できないことを指摘した。このことから、大阪湾底層の貧酸素水塊の形成過程に関しては、密度躍層下層における水平方向および鉛直方向の輸送との関連から詳細に検討する必要がある。

3. 数値モデルの概要

(1) 三次元バロクリニック流れモデル

三次元流動場や密度場の計算はこれまで大阪湾、東京湾、伊勢湾で適用してきた三次元バロクリニック流れの数値モデルを用いている。詳細は中辻(1994)に記載している。

(2) 三次元生態系水質モデル

水質モデルは窒素、リン、COD、溶存酸素の生物化学的な変化過程をモデル化している。平均流による物質の輸送および乱れによる拡散は三次元バロクリニック流れモデルで予め求めた流速三成分と渦拡散係数を用いる。計算対象とする物質形態は生物体有機物を代表する植物プランクトン量としてクロロフィルa、栄養塩として無機態窒素、無機態リン、非生物体の有機態窒素、有機態リン、化学的酸素要求量、さらに溶存酸素(DO)を設定した。ここで、非生物体有機物はデトリタス態と溶存態の有機物の総称としている。水質モデルの詳細は、山根ら(1998b)に記載している。

(3) 計算条件

計算対象領域は大阪湾を中心とした64 km四方(図-3参照)を対象とし、水域分割は水平方向に1 kmメッシュ、鉛直方向は湾内の流動・密度の鉛直分布をより正確に表現するために、表層から2 m×15層位、4 m, 6 m,

表-1 流動、水質計算の境界条件

モデル	境界条件		夏季	冬季	
流動モデル	海面境界	気温 °C	26.7	5.5	
		湿度	6.7	6.1	
		風速 m/s	3.0	3.5	
		水蒸気圧 hPa	25.8	5.8	
		日射量 W/m ²	193.5	76.4	
	陸側境界	流入量 m ³ /s	淀川	367.9	142.1
			大和川	27.2	16.1
		流入水温 °C	28.9	7.0	
	流入塩分 psu	20.0	23.0		
	海側境界	潮汐変動	M ₂ 大潮 (平均潮)		
水温 °C		22.0	11.2		
塩分 psu		32.0	32.0		
水質モデル	陸側境界	流入	COD	423	326
		負荷量 t/日	T-N	253	220
			T-P	17	14
	海側境界	外海水質 (mg/l)	COD	明 2.6, 紀 1.9	明 1.3, 紀 1.1
			T-N	0.38, 0.38	0.34, 0.34
			T-P	0.039, 0.031	0.029, 0.029
			クロロフィル	0.005, 0.005	0.004, 0.004
			DO	8.1, 8.1	9.0, 9.0

10 m×2層位の全19層位とした。計算に用いた夏季および冬季の境界条件を表-1に示す。計算の初期条件、境界条件ならびに計算の手順は、山根ら(1998a, 1998b)と同じである。ただし、夏季の計算では7, 8月の観測データの平均値を、冬季の計算では1, 2月の平均値を用いている。

4. 数値実験結果と考察

(1) 大阪湾の流動密度構造

図-4は夏季と冬季の1潮汐積分した流速場(残差流系)と密度場の水深3 mの水平分布と東西方向A-A断面の鉛直分布を示す。大阪湾の夏季の密度分布は、湾西部では水深方向にほぼ一様な強混合状態、一方、湾東部では淀川系河川水に影響された成層状態となっている。大阪湾でみられる代表的な残差流は湾西部の沖ノ瀬環流

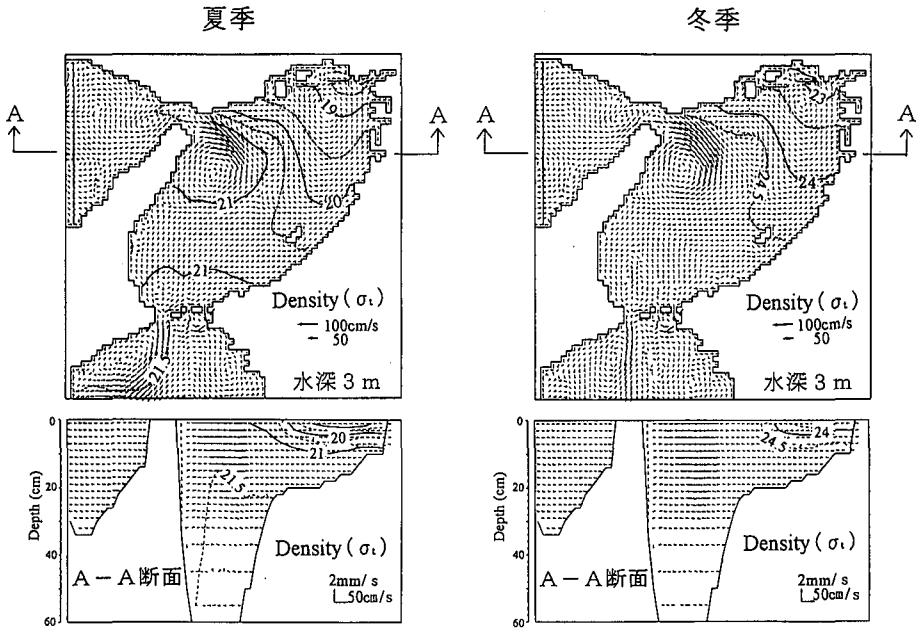


図-4 大阪湾の水深3mと東西A-A断面の残差流と密度(σ_t)の分布(左:夏季, 右:冬季)

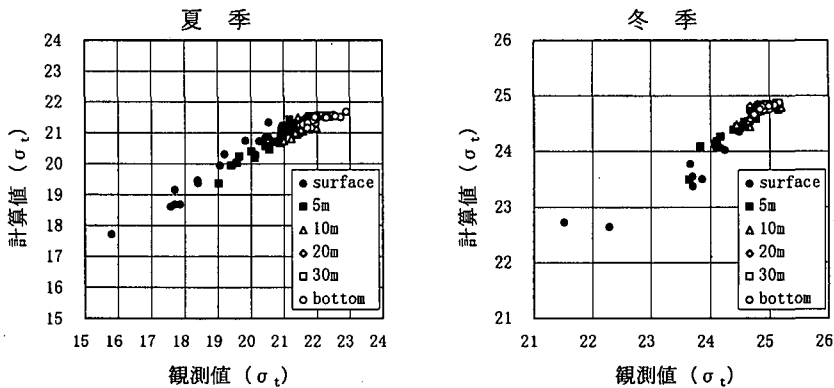


図-5 大阪湾の水深別密度(σ_t)の計算値と観測値の比較

と湾東部の西宮沖環流である。西宮沖環流は湾北東部の成層界面の上層に発達する時計回りの水平循環流である。この成層海域では上層では湾口に、下層では湾奥に向かうエスチュアリー循環が卓越していることが同図よりわかる。一方、冬季の大阪湾の密度分布は、東部成層海域は夏季に比べて若干規模が小さくなっているものの、湾西部の強混合域と湾東部の成層海域の形成は夏季とほぼ同様の傾向を示している。東部成層海域の規模の若干の縮小は冬季における淀川系河川流量の流入の減少に起因している。冬季の流れ場については、成層水域の縮小に伴い同水域に形成される西宮沖環流も規模を小さくしている。しかしながら、湾西部の沖ノ瀬環流、湾東部の西宮沖環流やエスチュアリー循環構造は冬季におい

ても維持されている。夏季、冬季の密度分布について、計算結果と浅海定線調査結果と比較したのが、図-5である。計算結果は良好に観測値を再現している。

(2) 大阪湾の溶存酸素分布

大阪湾における溶存酸素の分布の季節変化を把握するために、夏季と冬季の計算を行った。図-6は夏季および冬季の水質計算における1潮汐平均溶存酸素濃度の底層平面分布と東西方向のA-A断面の鉛直分布を示す。また、図-7は、夏季と冬季における底層の溶存酸素飽和度の観測値と計算値の比較を示す。観測値は8月と2月の1983~1992年の10年間の平均値を夏季と冬季のデータとして用いた。夏季の底層の溶存酸素濃度は湾奥沿岸部で4 mg/l以下であり、低酸素化が現れている。図-1に

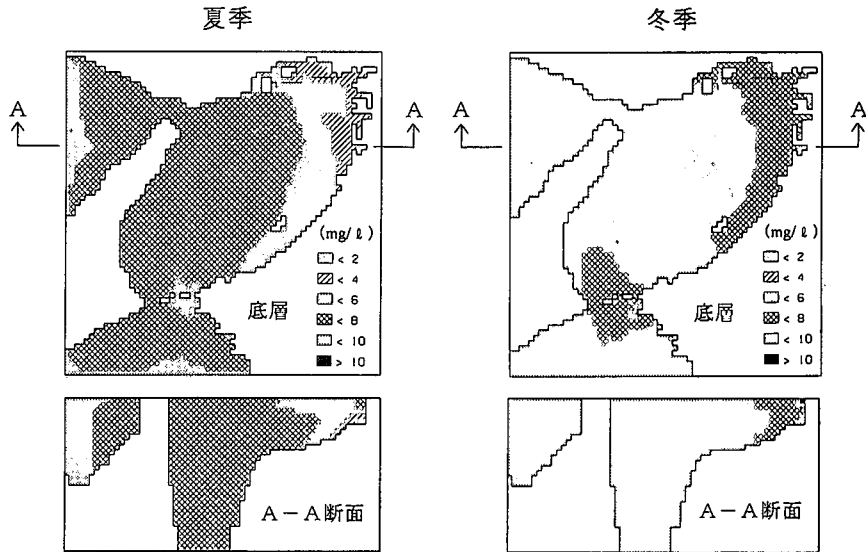


図-6 大阪湾の底層と東西 A-A 断面の溶存酸素濃度分布 (左: 夏季, 右: 冬季)

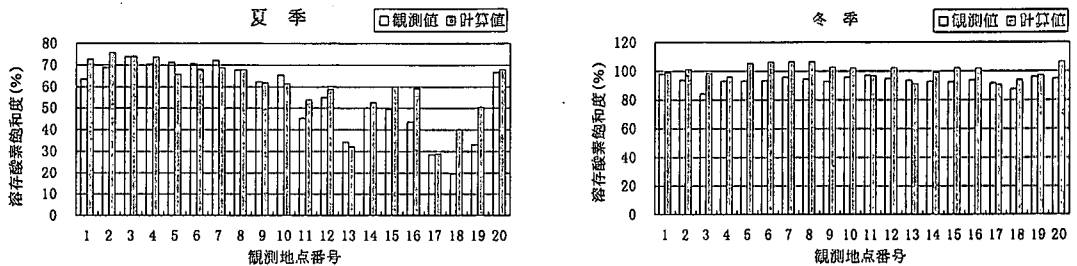


図-7 大阪湾の底層の溶存酸素飽和度の計算値と観測値の比較

示した浅海定線調査における底層の溶存酸素飽和度も、湾中央の 20 m 等深線より東部で 50% 以下、湾奥沿岸部で 30% 以下となっている。このことから、湾奥部では計算結果の方が貧酸素化の度合いを若干小さく予想している。しかしながら、計算値は観測値の分布状況を概ね再現していると判断できる。一方、冬季については底層の溶存酸素飽和度の計算値は湾の全域でほぼ 90% 以上となっており、これも観測値の分布を再現している。

(3) 大阪湾の溶存酸素収支と貧酸素水塊形成機構

大阪湾の貧酸素水塊の形成過程を把握するために、次に示す下層域における溶存酸素収支式の各項を 1 潮汐積分した値で評価してみる。

$$\begin{aligned} \partial DO / \partial t = & (\text{水平移流}) + (\text{鉛直移流}) + (\text{水平拡散}) \\ & + (\text{鉛直拡散}) + (\text{生産} = \text{光合成}) + (\text{呼吸}) \\ & + (\text{水中消費}) + (\text{底泥消費}) \cdots \cdots (1) \end{aligned}$$

計算地点は大阪湾の淀川河口から長軸方向の潮汐フロント沖合までの代表地点(図-3 参照)における下層部を対象とした。ここで、下層部は成層界面(水面下 6 m)より深い水域と定義する。つまり、考えるコントロールボ

リュームは $1 \text{ km} \times 1 \text{ km} \times (\text{成層界面下の水深})$ である。図-8 は夏季と冬季における躍層下層の溶存酸素収支式の各項の 1 潮汐間の積分量を示している。夏季においては、湾奥から F 地点(沖合 17 km 付近の 20 m 等深線付近であり、フロントの位置に相当している)までの範囲においては、底泥による酸素消費が明瞭に認められる。もう一つの溶存酸素の減少の原因は鉛直方向移流(上向き)による輸送である。従来、下層における酸素供給は上層からの鉛直混合が卓越するものと考えられていた。しかしながら、本計算においては、逆に溶存酸素が下層から上層へと輸送される結果となっている。下層における溶存酸素の減少を補うものは水平移流による輸送である。大阪湾の湾奥成層海域では、エスチュアリー循環に伴う西部海域からの水平移流と鉛直湧昇流が卓越している。このため、従来考えられていた上層から下層への酸素の鉛直輸送はほとんど期待できない。このことから、大阪湾における下層水域の貧酸素化は、底泥における酸素消費フラックスと水平移流に伴う酸素供給フラックスの釣り合いで決まっていると考えられる。西部海域から侵入

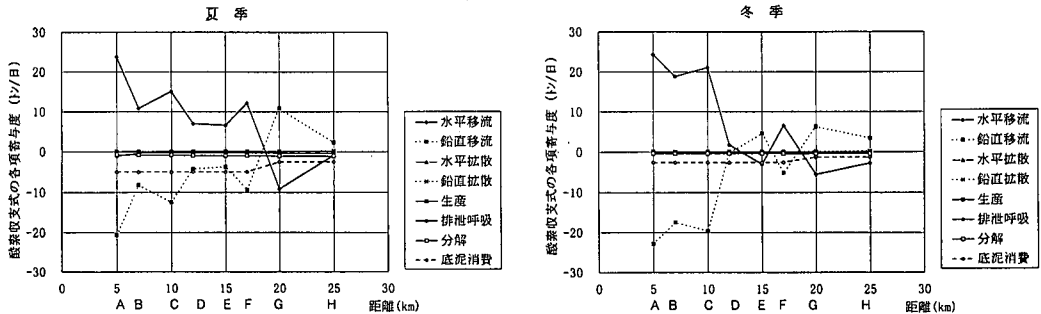


図-8 大阪湾の長軸方向代表地点の成層界面下層における酸素収支式の各項寄与度の比較

した底層の海水は、湾奥に向かうにしたがって、底泥による消費が増加する。それにとまって溶存酸素量を次第に低下させていく。このため、東部湾奥海域の底層における貧酸素化が生じるものと考えられる。冬季においては、底泥による酸素消費は、水温の低下にともない夏季の半分程度となっている。一方、主要な酸素供給源である水平移流による酸素フラックスは、潮汐フロントより湾奥部では、夏季に比べて大きくなっている（冬季は潮汐フロントが沿岸に移動し、代表D地点付近にある）。大阪湾をはじめとする内湾や湖沼では、冬季の底層の貧酸素化はあまり見られない。それは、冬季の水温低下による底泥の酸素消費速度が小さくなること、さらに冬季は水塊の循環期に入り上下混合が進むためと考えられてきた。しかしながら、大阪湾では冬季においても密度成層は東部湾奥海域で維持されており、エスチュアリー循環も夏季と同様に発達している。このため、大阪湾において冬季に貧酸素化がみられない要因としては、底泥による酸素消費が弱められることに加えて、潮汐フロントが湾奥沿岸寄りに移動することによって、西部海域からの水平移流による酸素供給フラックスが増大することも一つの要因であると考えられる。

以上の結果により、大阪湾における貧酸素化現象は鉛直一次元的な構造ではなく、エスチュアリー特有の鉛直循環によって生じる鉛直方向輸送の大小が大きな要因となっていることが分った。

5. ま と め

本研究で得られた結果をつぎに示す。

(1) 成層した湾奥部（点AからFまでの範囲）における溶存酸素の減少（消費側）の原因は、底泥による酸素消費と鉛直方向移流による輸送である。従来、下層における溶存酸素供給は上層からの鉛直輸送が卓越するも

のと考えられていた。しかしながら、本計算では、酸素が逆に下層から上層へと輸送される結果となっている。この下層における溶存酸素の減少を補うものは水平移流による輸送（供給側）である。これは正しくエスチュアリー循環であり、物質の輸送において重要な役割を果たしていることがわかる。この結果は従来考えられていた上層から下層への酸素の鉛直輸送を否定するものである。

(2) 冬季においても夏季と同様の現象が生じていると推測される。ただし、水温の低下に伴い、底泥による酸素消費は夏季の半分程度となる。一方、主要な酸素供給源である水平移流による酸素フラックスは、潮汐フロントより湾奥部では夏季に比べて大きくなっている。この結果、冬季は夏季に比べて底層の貧酸素化は抑制される。

参 考 文 献

- 大阪府水産試験場(1973-1992): 浅海定線調査, 大阪府水産試験場事業報告。
- 城久(1986): 大阪湾における富栄養化の構造と富栄養化が漁業生産に及ぼす影響について, 大阪府水産試験場報告, 第7号, pp. 1-174。
- 中辻啓二(1994): 大阪湾における残差流系と物質輸送, 水工学シリーズ94-A-9, 土木学会水理委員会, pp. A9. 1-28。
- 中村由行, 西村 肇(1988): 沿岸域における貧酸素水塊の形成機構, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 802-806。
- 山根伸之, 寺口貴康, 中辻啓二, 村岡浩爾(1996): 浅海定線調査に基づく大阪湾の水質/密度構造の季節変化, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 331-335。
- 山根伸之, 寺口貴康, 中辻啓二(1998a): 大阪湾湾奥部のエスチュアリー循環と栄養塩収支, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1061-1065。
- 山根伸之, 寺口貴康, 中辻啓二, 村岡浩爾(1998b): 大阪湾における水質の季節変動に関する数値実験, 水工学論文集, 第42巻, pp. 739-744。